

磁歪式振動発電デバイスを用いた海岸・港湾施設前面波浪エネルギーの利用に関する研究

著者	斎藤 武久, 我妻 純平, 上野 敏幸, 西本 聖史
雑誌名	土木学会論文集B2(海岸工学) = Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)
巻	72
号	2
ページ	I_1543-I_1548
発行年	2016-11-15
URL	http://hdl.handle.net/2297/46785

doi: 10.2208/kaigan.72.I_1543

磁歪式振動発電デバイスを用いた海岸・港湾施設前面波浪エネルギーの利用に関する研究

斎藤 武久¹・我妻 純平²・上野 敏幸³・西本 聖史⁴

¹正会員 金沢大学教授 環境デザイン学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

E-mail:saitoh@se.kanazawa-u.ac.jp

²北陸電力株式会社 (〒930-8686 富山市牛島町15-1)

³金沢大学准教授 電子情報学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

⁴株式会社神鋼環境ソリューション (〒651-0072 神戸市中央区脇浜町一丁目4-78)

本研究では片持ち梁型の磁歪式振動発電デバイスを用いて海洋域での波浪エネルギー利用に関する室内実験を行った前報に続き、海岸・港湾構造物前面での重複波による波力利用を目的に室内発電実験を行った。その際、振動発電デバイスには片持ち梁型を改良したU字型振動発電デバイスを利用し、外力の受動部を予め永久磁石で吸着しているデバイスから急速に脱着させることでデバイスに自由振動を励起させる方式、さらに、永久磁石を用いないでバネによって自由振動を励起させる方式の場合を検討を行った。

実験の結果、U字型振動発電デバイスでは従来の片持ち梁型発電デバイスに比べ共振振動時間が格段に長く、永久磁石での脱着を利用した場合、従来値の20倍を超える発電を実現できる事が明らかになった。

Key Words : wave energy, magnetostrictive vibrational power generator, coastal structure's front

1. 緒論

四方を海に囲まれた我が国は、海洋エネルギーの賦存量が大きい¹⁾こともあり、NEDOは波力発電技術や潮力発電技術、その他海洋エネルギー発電技術について早期に実用化・事業化を図ることが重要としている。特に海洋エネルギー発電技術については、開発した技術を実海域において実証を行うとともに、発電コストの低減等に向けた技術開発を行い、中長期的に他の再生可能エネルギーと同程度の発電コストを達成することを目指すとし、その技術的課題を提示している²⁾。そのターゲットには我が国において実海域試験が行われた波力発電方式³⁾が挙げられ、現在OWC(Oscillating Water Columns)内での共振特性を活用したさらなる技術開発が進められている⁴⁾。

一方で、元の波浪エネルギーを複数の変換過程を経て電気エネルギーに変換するこのシステムでは、エネルギー変換に伴う損失が大きい。このため、エネルギー損失の少ないデバイスの開発は将来の再生可能エネルギーの効率的な利用促進への鍵であり多くの研究が行われている。例えば、陸田ら⁵⁾は波動運動に追従した柔軟圧電材料の変形から電力を獲得する弾性圧電デバイスを用いた波エネルギー利用の研究に着手し、海洋域^{6,7)}および沿岸域^{8,9)}での利用を精力的に進めている。これに関連して、上野・山田¹⁰⁾は、鉄ガリウム合金磁歪材料^{11,12)}を用

いた振動発電技術を提案している。この材料の大きな特徴は材料が延性材料であり、外力に対して非常に強く良好な加工性を有していること、さらに最大1T以上も磁束密度が変化すること¹³⁾から、圧電材料よりも大きな電力の取得を可能とする¹⁴⁾。この磁歪材料を用いた振動発電デバイスを活用して著者ら¹⁵⁾は海洋域の波浪エネルギー利用に関する室内実験の研究を行い、柔軟圧電材料に比べて格段に大きな電力の取得に成功している。本研究では、海洋域での磁歪式振動発電デバイスの利用に続き海岸および港湾施設前面で発生する重複波の波エネルギーの利用を試みる。その際、前報¹⁵⁾での片持ち梁型の振動発電デバイスを改良したU字型振動発電デバイスを使用する。

2. U字型振動発電デバイスの構造

図-1(a)および図-1(b)に前報¹⁵⁾の片持ち梁型振動発電デバイス¹⁵⁾およびU字型振動発電デバイスの概要を示す。発電機はコイルを巻いた板状の磁歪素子とヨークからなる構造であり、この側面に永久磁石が配置されている。また、発電は磁歪素子が圧縮および引張を受けると周辺の磁束密度が変化する逆磁歪効果を利用した電磁誘導によるものである。なお、磁歪材料による発電が可能となる周波数帯域は比較的高周波数帯域で、外力となる波動

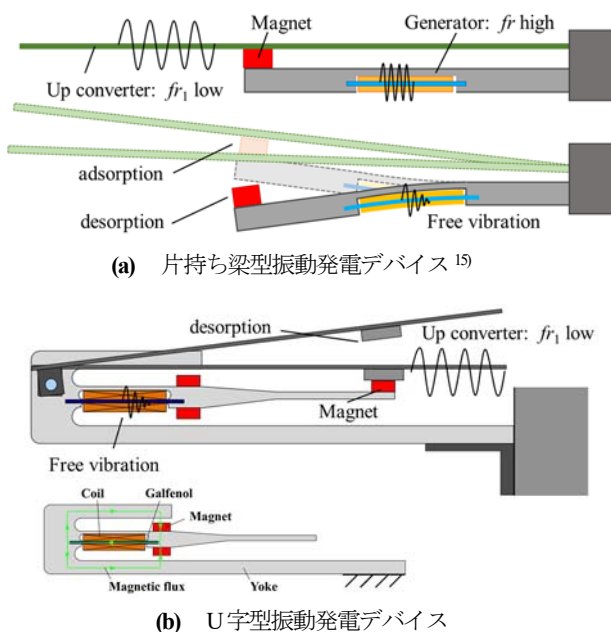
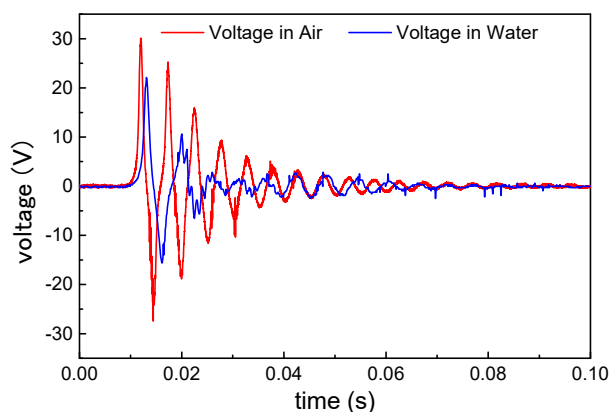
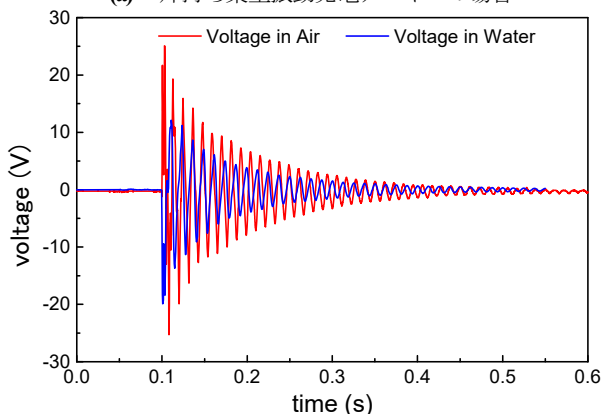


図-1 磁歪式振動発電デバイスの概要



(a) 片持ち梁型振動発電デバイスの場合¹⁵⁾



(b) U字型振動発電デバイスの場合

図-2 磁歪素子の振動継続時間

の低周波振動から磁歪素子に高周波振動を発生させる周波数コンバータの詳細に関しては前報¹⁵⁾を参照されたい。なお、本研究で採用したU字型振動発電デバイスの場合、空中および水中での共振振動数（発電が最も効率的に可能となる周波数）はそれぞれ87Hzおよび78Hzである。

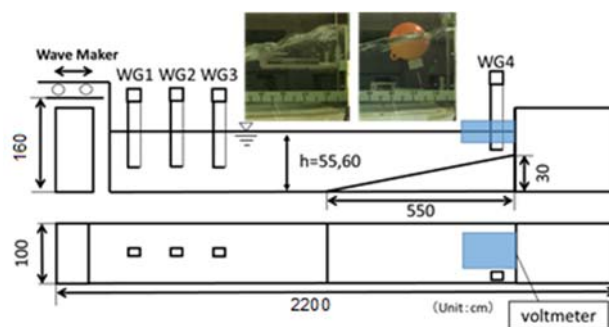


図-3 実験装置の概要

磁歪材料による電力量 I は磁歪素子に巻き付けられているコイル両端で発生する電位差 V 、このコイル両端に結線する抵抗値 R (本研究では 130Ω を使用) を用いて次式のように表され磁歪素子の振動時間 t に比例する。

$$I = \int \frac{V^2}{R} dt \quad (1)$$

このため、磁歪素子の振動継続時間が電力の取得性能を左右する。図-2(a)および図-2(b)に梁型デバイスおよびU字型デバイスの自由振動実験の結果を示すが、U字型デバイスの場合音叉構造に伴う共振現象の発生に伴って、梁型デバイスに比べて10倍以上の振動時間が確保されていることが分かる。

3. 実験装置および実験方法

図-3に実験装置の概要を示す。実験には吸収式造波装置を有する長さ22m、高さ1.6m、幅1mの両面ガラス張りの2次元造波水槽を用いた。水槽の岸側端部には護岸模型が設置してあり、沖側の水平底面から護岸模型前面に向けて約1/20勾配の斜面を有している。磁歪式振動デバイスはこの護岸前面に設置して護岸前面での重複波を作用させる。なお、水槽底面から護岸天端までの高さは70cm、護岸前面での斜面の高さは30cmである。

永久磁石の脱着による振動励起を利用した振動発電の場合、図-3に示したWG1、WG2およびWG3地点の波高計測結果から求めた入射波高が $H=9.1\sim18.9\text{cm}$ 、波の周期が $T=1.5\sim2.5\text{s}$ となる規則波およびBretschneider・光易型の周波数スペクトルを有する有義波高が $H_{1/3}=10.2\sim19.7\text{cm}$ 、有義周期が $T_{1/3}=1.5\sim2.5\text{s}$ の不規則波を作用させた。なお、WG4地点では振動発電デバイスからの出力電圧との同期を取って護岸前面での水面変動を計測する。水深は沖側の水平底面部で $h=55\text{cm}$ として波受け板と水表面との距離(クリアランス)が $R=0, 2$ および 4cm となるようにデバイスの位置を変化させた。波高計および振動発電デバイスからの出力電圧の計測は造波開始から約1分後に規則波の場合は100s間、不規則波の場合200波を上回る計測時間を確保し、サンプリング周波数をWG1、WG2お

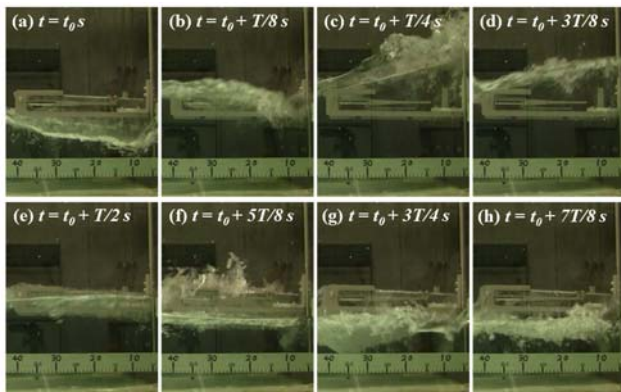


図-4 護岸前面での水面および波受け板の運動の状況 ($H=14.0\text{cm}$, $T=2.0\text{s}$, $R=2\text{cm}$)

およびWG3の波高データに対しては100Hz, WG4の水面変動データおよび振動発電デバイスからの出力電圧データに対しては2kHzとした。

一方、バネによる振動励起を利用した振動発電デバイスの場合、沖側の水平底面での水深を $h=60\text{cm}$ に固定して、入射波高が $H=5.7\sim 13.9\text{cm}$ 、波の周期が $T=1.5\sim 2.5\text{s}$ の規則波を作用させた。

4. 外力受動部での永久磁石の脱着による振動励起を利用した振動発電の場合の発電特性

図-4に静水面から波受け板までのクリアランス $R=2\text{cm}$ 、周期 $T=2.0\text{s}$ 、入射波高 $H=14.0\text{cm}$ の規則波を作用させた実験におけるスナップショットを示し、同実験ケースにおいて、磁石が脱着・吸着したときの護岸前面での水位変動とデバイスから出力される電圧の時系列変化を図-5の上段に示す。なお、図-5の下段は時間軸を拡大表示して、水面がゼロアップクロスおよびゼロダウンクロスする際の電圧の時系列変化を示したものである。図-4より護岸前面で発生する重複波による水位上昇に伴って、波受け板に上向きの流体力が作用し、波受け板が磁石から離脱して磁歪素子が自由振動することで電圧波形が発生し、振動を伴った発電が継続していることが確認できる(図-5)。水面がゼロアップクロスする際の波受け板の磁石からの脱着時における最大電圧は10V程度となっている。加えて水面がゼロダウンクロスして打ち上がった水塊の落下に連動して波受け板が磁石に吸着する場合でも吸着時の衝撃によって最大で10V程度の電圧が発生していることが分かる。なお、波受け板を用いた場合の電圧の振動特性について周波数解析を行った結果を図-6に(波受け板の磁石からの脱着時)および図-7に(波受け板の磁石への吸着時)例示するが、磁石脱着時の出力電圧振動は水中での固有振動数78Hzとほぼ一致し、さらに、磁石への吸着時には78Hzに加えて、磁石へ吸着した波受け板を含めたデバイス全体での振動と考えられるより低周波な振動成分が確認できる。

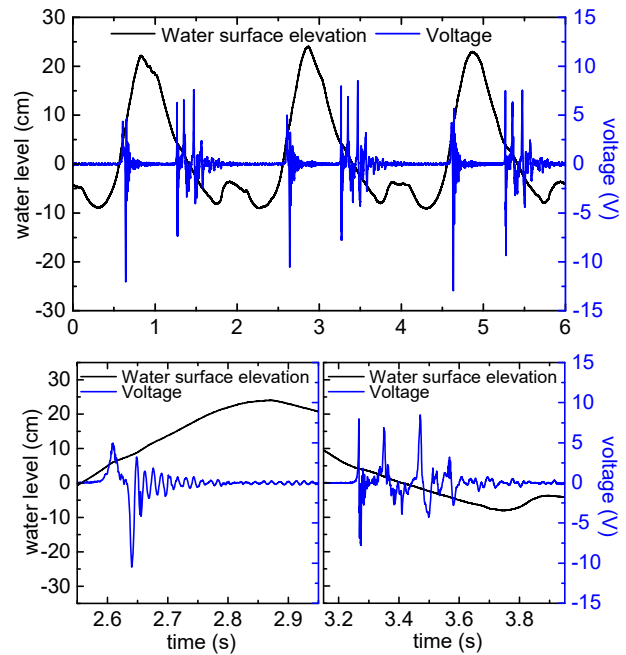


図-5 波受け方式の波力発電システムに規則波を作用させた場合の護岸前面での水位および発生電位差の時間変化特性 ($H=14.0\text{cm}$, $T=2.0\text{s}$, $R=2\text{cm}$)

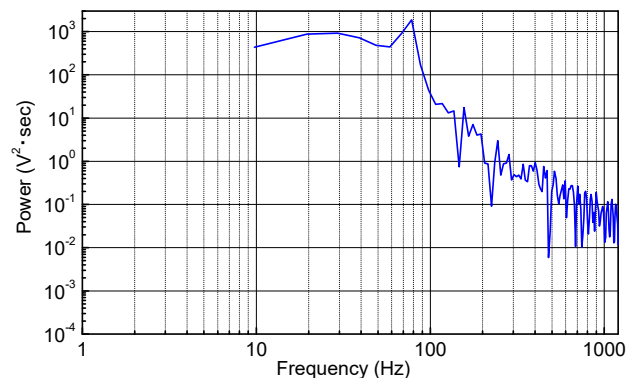


図-6 波受け板が磁石から脱着するときの電圧波形の周波数特性 ($H=14.0\text{cm}$, $T=2.0\text{s}$, $R=2\text{cm}$)

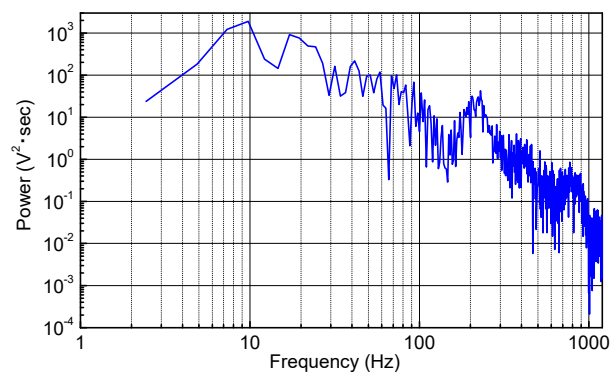


図-7 波受け板が磁石へ吸着するときの電圧波形の周波数特性 ($H=14.0\text{cm}$, $T=2.0\text{s}$, $R=2\text{cm}$)

次に、不規則波を作用させた場合について、図-8に有義波高が $H_{1/3}=15.4\text{cm}$ 、有義周期が $T_{1/3}=2.0\text{s}$ の不規則波を $R=2\text{cm}$ の位置に設置された振動発電デバイスに作用させた場合の護岸前面水位と出力電圧の時間変化を示す。なお、下段の図は時間軸を拡大したものである。様々な波

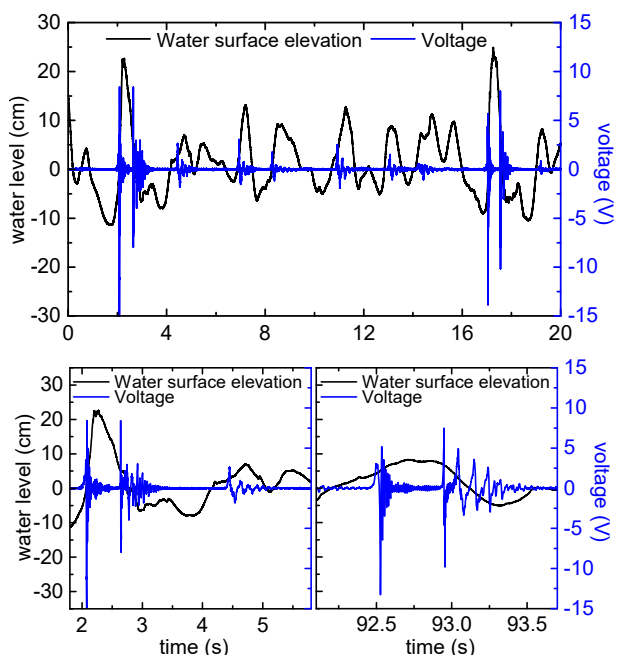


図-8 波受け方式の波力発電システムに不規則波を作用させた場合の護岸前面での水位および発生電位差の時間変化特性 ($H_{1/3}=15.4\text{cm}$, $T_{1/3}=2.0\text{s}$, $R=2\text{cm}$)

高の波が来襲しているが、比較的波高の高い波が来襲した際に波受け板は磁石から脱着し、電圧の振動波形が現れていることが確認できる。

以上の結果を整理して図-9に入射波高の変化にともなう1秒あたりの発電量の変化を示す。入射波高の増大に伴って発電量は増加する傾向にある。この理由の一つに入射波高の増大に伴って計測時間内に観測される発電の回数が増加することが挙げられる。波受け板が確実に脱着可能となる入射波の波高と周期特性の精査が必要となるが、本研究での実験範囲では、特に不規則波の場合に周期に比べて波高の変化に対して発電発生回数が連動していることが図-10より確認できる。なお、本研究での実験範囲では最大で25.9mWの発電量を獲得している。

5. バネによる振動励起を利用した振動発電デバイスの場合の発電特性

波受け板の永久磁石からの離脱で発電素子の固有振動を誘発する周波数アップコンバート機構を採用した上述の方法に代わって、ここでは、永久磁石を用いずに、バネを利用した振動発電デバイスの発電特性について考究する。具体的には図-11に示すように護岸前面にU字型の振動発電デバイスを固定し、デバイスの自由端に引張バネを介して浮体(直径240mm)を取り付け、護岸前面での水面の上下動から浮体に働く流体力を利用する。水位の上昇に伴って浮体への流体力でバネが伸びることでデバイスの自由端に変位を与え、水位の下降に伴って浮体が下がり、バネが縮むことによってデバイスの自由端が

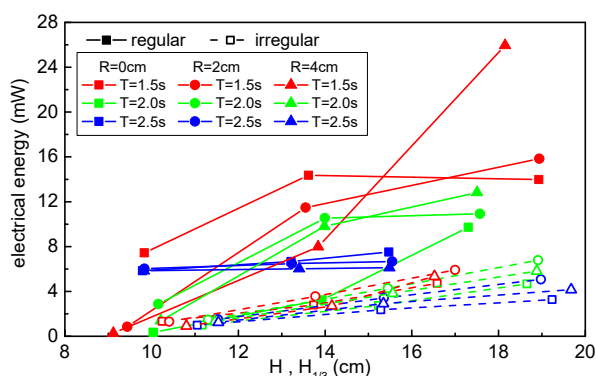


図-9 波受け板方式の波力発電システムにおける入射波高の変化に伴う一回の発電で取得できる発電容量の変化特性

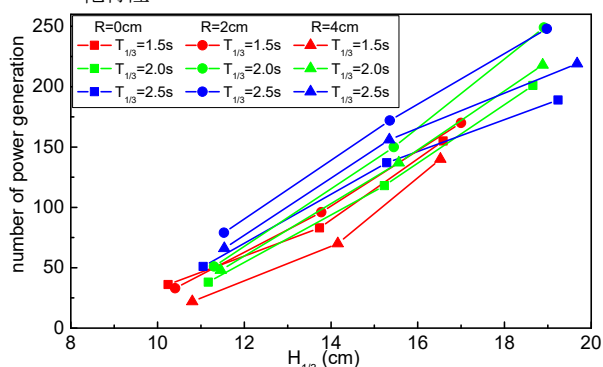


図-10 波受け板方式の波力発電システムに不規則波を作用させた場合の発電回数の変化特性

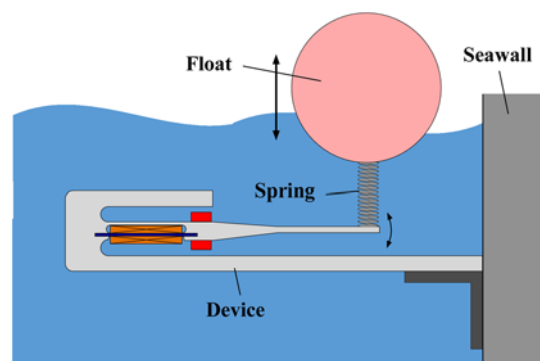


図-11 バネを利用した振動発電デバイスの概要

開放され発電素子の振動が起こり電圧が発生するような構成を考える。

図-12に入射波高が $H=10.2\text{cm}$ 、波の周期が $T=1.5\text{s}$ の規則波を作用させた場合のスナップショットを示し、同実験条件において、水位上昇時に発生する電圧の振動波形および水位下降時に発生する電圧の振動波形と護岸前面での水位変動の時系列変化を図-13に示す。図より電圧の振動波形は、護岸前面で発生する重複波による水位上昇に伴ってバネが伸び、デバイスが上方向の力を受けて発電し、水位の下降に伴ってバネに蓄積されたエネルギーの開放によってデバイスが振動していることが確認できる。ただし、バネ式の場合は浮体に作用する流体力を利用するため、護岸前面で波受け板に作用する波力を利

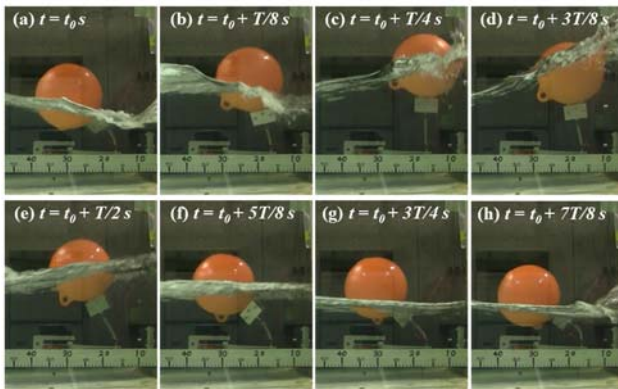


図-12 護岸前面での水面および浮体・バネの運動の状況 ($T=1.5s, H=13.6cm$)

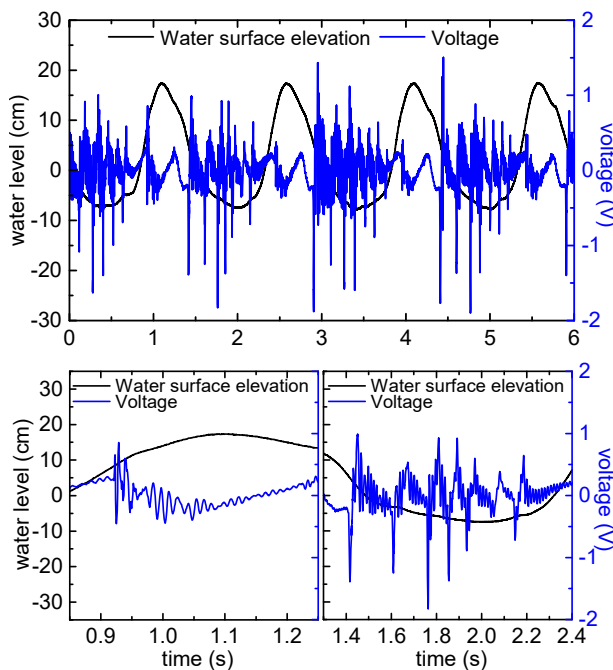


図-13 バネ方式の波力発電システムに規則波を作用させた場合の護岸前面での水位および発生電位差の時間変化特性 ($T=1.5s, H=13.6cm$)

用する波受け板式に比べて振動発電デバイスに作用する外力が小さくなる。このため、バネ式では磁歪素子の変形速度が波受け板式に比べて小さく出力電位差は1/10程度になっている。

このときの電圧の振動を周波数分析した結果を図-14におよび図-15に示すが、水面の上昇時と下降時のどちらにおいても振動発電デバイスの水中での共振周波数である78 Hz程度の周波数振動が確認でき、水面の上昇時および下降時の両方においてデバイスの自由振動が励振されていることが分かった。また、10 Hz前後の比較的低い周波数の振動が発生しているが、この振動は浮体とバネが一体となって上下動によって発生する振動と考えられる。

図-16に入射波高の変化に対する1秒あたりの発電量の変化のグラフを示すが、図より1秒あたりの発電量は波受け板を使用した場合と同様に、入射波高の増大に伴っ

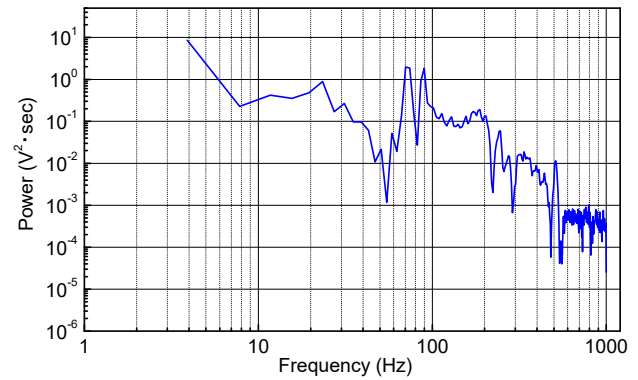


図-14 水面上昇時の電圧振動の周波数特性 ($T=1.5s, H=13.6cm$)

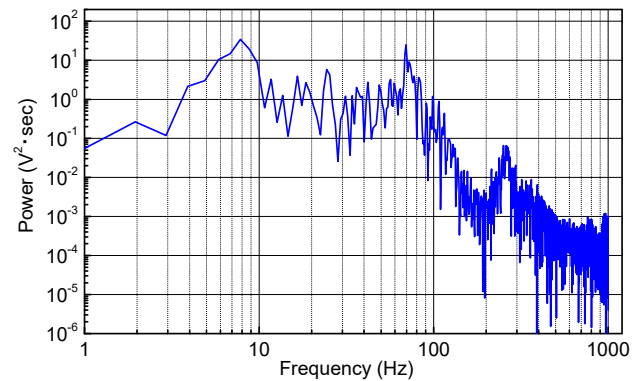


図-15 水面下降時の電圧振動の周波数特性 ($T=1.5s, H=13.6cm$)

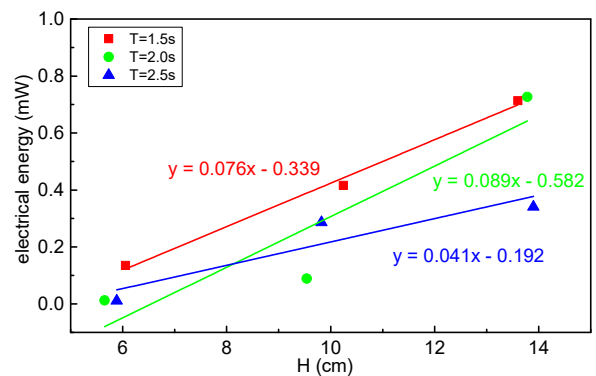


図-16 バネ方式の波力発電システムに規則波を作用させた場合の護岸前面での水位および発生電位差の時間変化特性 ($T=1.5s, H=13.6cm$)

て増加する傾向が確認できる。

6. 結論

本研究では、海洋域での波浪エネルギー利用に関する室内実験を行った前報¹⁵⁾に続き、海岸・港湾構造物前面での重複波による波力利用を目的に、新たに開発したU字型振動発電デバイスを利用して、外力の受動部を予め永久磁石で吸着しているデバイスから急速に脱着させることでデバイスに自由振動を励起させる方式、さらに、永久磁石を用いずにバネによって自由振動を励起させる方式の場合の発電特性を実験的に考究した。以下に本研究で得られた結果を要約し本研究の結論を述べる。

自由振動実験の結果から、デバイス形状にU字型形状を採用することで従来の片持ち梁構造の振動発電デバイスに比べ、自由振動の継続時間を10倍近く長くすることが可能となることが確認された。

波受け板を利用して重複波のエネルギーを振動発電デバイスの固有振動に変換する波力発電システムを作成した。本システムを用いて波浪エネルギーから発電が可能であり、本研究の実験範囲において最大で単位時間あたり25.9mJの発電が可能となることが分かった。

浮体およびバネ機構を利用して重複波のエネルギーを振動発電デバイスの振動に変換する波力発電システムを作成した。本システムを用いて波浪エネルギーから発電が可能であり、本研究の実験範囲において最大で単位時間あたり0.73mJの発電が可能となることが分かった。

なお、本研究の一部はCREST微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出(磁歪式振動発電の実用化に向けた革新的メカニズム・材料の創成：代表上野敏幸)による研究助成によるものであることを記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 高橋重雄，安達崇：日本周辺における波パワーの特性と波力発電，港湾技研資料，No.654，18P，1989。
- 2) (独法)新エネルギー・産業技術総合開発機構：NEDO再生可能エネルギー技術白書第2版－再生可能エネルギー普及拡大にむけて克服すべき課題と処方箋－(2014年PDF版)，
http://www.nedo.go.jp/library/ne_hakusyo_index.html
参照 2015-4-27。
- 3) 高橋重雄，安達崇，田中智：改良型波力発電ケーソン防波堤の特性－波エネルギーの利用に関する研究第7報－，港湾技術研究所報告，第27巻第2号，pp.23-57，1988。
- 4) 有川太郎，窪田幸一郎，下迫健一郎，武田将英，五十嵐学，加藤大，金谷泰邦，木原一禎，細川恭史，中村忠之：振動水柱型空気タービン方式波力発電装置付きケーソンの発電効率に関する検討，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 69，No. 2，pp. I_1306-I_1310，2013。
- 5) 陸田秀実，川上健太，黒川剛幸，土井康明，田中義和：弾性圧電デバイスを用いた波エネルギー利用技術の開発，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 65，No. 1，pp. 1296-1300，2009。
- 6) 陸田秀実，川上健太，平田真登，土井康明，田中義和，柳原大輔：弾性圧電デバイスを用いた海洋エネルギー利用技術に関する研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 66，No.1，pp. 1276-1280，2010a。
- 7) 陸田秀実，東 翔太，渡邊隆太，田中義和，土井康明：垂下式弾性浮体ユニット型海洋エネルギー発電方式の発電特性，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 69，No. 2，pp. I_1316-I_1320，2013b。
- 8) 陸田秀実，平田真登，川上健太，土井康明，田中義和，柳原大輔：弾性圧電デバイスを用いた波浪発電に関する研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 66，No.1，pp. 1281-1285，2010b。
- 9) 陸田秀実，森崎 健一，田中義和，土井康明：引張・圧縮型柔軟発電デバイスを用いた波浪エネルギー利用方法に関する研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 69，No. 2，pp. I_1311-I_1315，2013a。
- 10) 上野敏幸，山田外史：磁歪材料を用いた小型振動発電素子の特性評価，日本 AEM 学会誌，Vol.20，No. 1，pp. 168 -173，2012。
- 11) Clark, A. E., Wun-Fogle, M. and Restorff, J. B. : Magnetostrictive Properties of Body-Centered Cubic Fe-Ga and Fe-Ga-Al Alloy, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 37, pp. 3238-3240, 2000.
- 12) Clark, A. E., Wun-Fogle, M. and Restorff, J. B. : Magnetostrictive property of Galfenol alloys under compressive stress, *Mater. Trans.*, Vol. 43, pp. 881-886, 2002.
- 13) Ueno, T. and Higuchi, T. : Magnetic Circuit for Stress-Based Magnetic Force Control Using Iron-Gallium Alloy, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 43, pp. 2594-2596, 2007.
- 14) Ueno, T. and Yamada, S. : Study on Micro-energy Harvesting Device Using Iron-Gallium Alloy, *J. Magn. Soc. Jpn.*, Vol. 35, pp. 88-91, 2011.
- 15) 斎藤武久・我妻純平・上野敏幸・北翔太：磁歪材料を用いた振動発電デバイスによる波浪エネルギー利用に関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.70，No.2，pp. I_1306 -I_1310，2014。

(2016.3.16 受付)

UTILIZATION OF WAVE ENERGY AT COASTAL AND HARBOR STRUCTURES FRONT USING MAGNETOSTRICTIVE VIBRATIONAL POWER GENERATOR

Takehisa SAITOH, Junpei WAGATSUMA, Toshiyuki UENO and Masashi NISHIMOTO

In this study, laboratory experiment carried out to measure electric power generated by new vibrational power generator using piezoelectric materials. U-type shaping device is adopted in this new power generator, and two types of wave receiving, plate-type and buoy-type, in front of coastal and harbor structures are tested.

As a result, it is possible to continue 10 times vibrational time compared to the time by previous power generator that adopted cantilever-type shaping device. And it is also possible to generate 20 times electric power compared to the power by previous cantilever-type shaping device.